第46卷 第1期
2023年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 1
Jan. 2023

基于PLUS模型的乌鲁木齐市生态服务价值权衡协同探究

隋 露[1]， 蒲春玲[2]， 刘志有[1]， 柏鹏飞[1]， 刘 涛[3]

（1. 新疆农业大学公共管理学院(法学院)，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆农业大学MPA教育中心，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 清华大学地球系统科学系，北京 100084）

摘 要：土地利用/覆被变化将干扰生态系统的稳定供给能力，进而对生态系统服务和可持续发展构成威胁。以乌鲁木齐市为研究区，基于斑块生成土地利用模拟(Patch-generating land use simulation，PLUS)模型，模拟了2030年多情景下乌鲁木齐市的土地利用变化，并结合当量因子法、空间自相关分析等方法估算并预测了1990—2030年乌鲁木齐市生态系统服务价值(Ecosystem service value, ESV)及其权衡协同关系。结果表明：(1) 1990—2020年乌鲁木齐市土地利用呈现"两增四减"变化趋势。2030年在惯性发展情景下，除林地外其他地类皆遵循历史演变规律；在生态保护情境下，建设用地面积萎缩，生态用地大幅增加；在综合开发情境下，建设用地面积有所增加的同时生态用地面积也处于上升状态；在重点开发情景下，城市建设用地扩张最为剧烈，耕地面积退化严重。(2) 1990—2020年乌鲁木齐市ESV整体上呈现"V"型下降态势，共减少59.59×10^8元。2030年在生态保护情景下和综合开发情景下ESV处于增加趋势，在惯性发展情景和重点开发情景下ESV出现减少趋势。(3) 2030年4种发展情景下，乌鲁木齐市各项生态系统服务间以协同关系为主，"高-高""低-低"协同聚集区与ESV高值、低值区域分布高度吻合，权衡关系零星分布于局部地区。研究结果可为乌鲁木齐市国土空间规划及生态安全格局构建提供科学参考。

关 键 词：生态系统服务价值；PLUS模型；多情景模拟；权衡协同；乌鲁木齐市

文章编号：1000-6060(2023)01-0159-10(0159~0168)

生态系统服务是指生态系统的结构和功能提供给人类的各种惠益，包括供给服务、调节服务、支持服务及文化服务[1]。联合国千年生态发展评估表明全球60%的生态系统服务正处于退化或不可持续状态，这将威胁到土地利用效益以及社会经济的发展[2]。土地利用的动态演变是人类活动改造生态系统的重要体现，它影响生态系统结构形成、功能供给和布局分配[3]。伴随着我国城市化进程的加快，区域人口、资源和环境问题不断凸显，探究城市土地利用变化与生态系统服务之间的作用关系已成为学术界研究的焦点[4]。

生态系统服务价值(Ecosystem service value, ESV)作为生态系统服务的量化响应指标，其能科学精准地揭示区域生态环境安全质量[5]。自Hughes等[6]学者开展生态系统服务探究以来，该领域的研究内容、方法、尺度、模拟模型等都逐渐趋于完善。研究内容主要涉及服务分类、价值评估、功能监测等[7]；研究方法主要包括统计描述、空间分析、情景模拟、服务流动性分析等[8]；研究尺度主要涵盖流域、城市群、行政单元等[9]。尽管国内外生态系统服务研究成果颇丰，但仍存在一定局限。从研究区域上来看，目前研究主要集中于流域、退耕还林还草区及经济发达地区城市群[10]，对占我国国土面积1/3以上的干旱区研究较少；从研究视角上来看，以往研究多基于历史统计数据进行静态评估，而动态评估特别是对未来精细尺度下的研究鲜有报道[11]；从模型模拟上来看，现有的土地利用模拟模型在解释地类变化驱动力和多类用地斑块生成方面表现较

收稿日期：2022-06-02； **修订日期**：2022-07-20
基金项目：新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2019SY011)资助
作者简介：隋露(1997-)，女，硕士研究生，主要从事景观生态学、土地资源可持续利用研究. E-mail: w1245887687@163.com
通讯作者：蒲春玲(1961-)，女，教授，主要从事土地资源可持续利用、区域经济研究. E-mail: puchunling@163.com

弱，而斑块生成土地利用变化（Patch-generating land use simulation，PLUS）模型可以有效解决上述问题，获得更精准的土地利用模拟结果[12]，但目前该方法较少的运用在预测区域生态系统服务权衡协同关系中。

近年来，国家政策的扶持、区域经济的发展使得乌鲁木齐市城市化进程加速、土地利用格局变化剧烈，经济发展与生态保护之间的矛盾愈发突显。鉴于此，本文在分析乌鲁木齐市1990—2020年的土地利用时空演变规律基础上，运用PLUS模型预测未来土地利用变化对ESV的影响并探究各项生态服务间的权衡协同关系，以期为乌鲁木齐市土地资源优化配置、生态环境保护修复提供决策支撑。

1 研究区概况

乌鲁木齐市地处亚欧大陆腹地，天山山脉中段北麓，准噶尔盆地南缘，下辖7区1县，总面积1.38×10^4 km²[13]（图1）。该市三面环山，地势东南高西北低，是世界上距离海洋最遥远的城市，年均降水量不足200 mm，属温带大陆性干旱气候。随着社会经济的迅速发展，乌鲁木齐市城市化速率大幅提升，截止到2020年区域人口数量达405.44×10^4人次，地区生产总值达3337.30×10^8元。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所用的乌鲁木齐市1990、2000、2010、2015年和2020年5期土地利用数据，空间分辨率均为30 m；模拟驱动因子经过投影变换、裁剪、重采样、距离分析等预处理后，统一转化为30 m×30 m的栅格；在ESV计算过程中使用的社会经济数据均来源于统计数据，具体见表1。

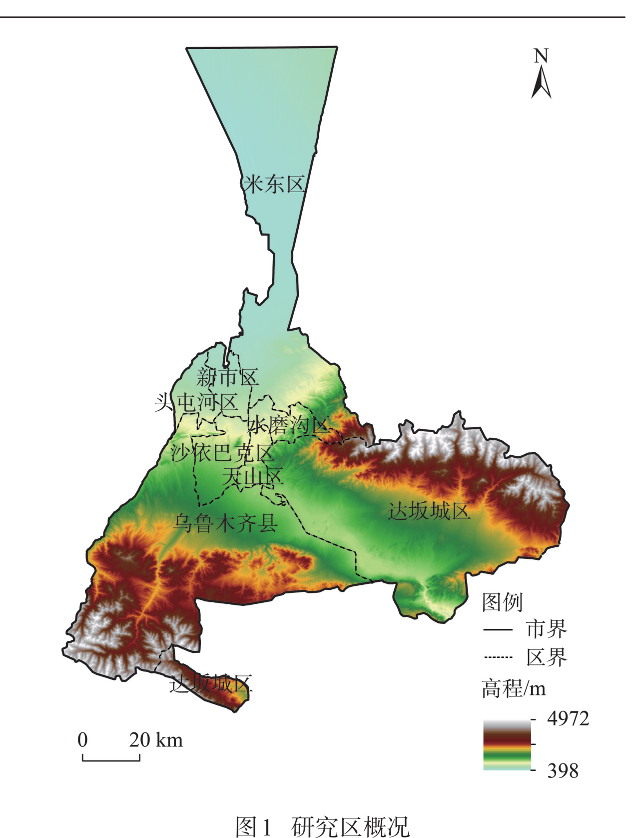


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用模拟 PLUS模型在保留未来土地利用模拟（Future land use simulation，FLUS）模型中自适应惯性竞争和轮盘竞争机制优势的基础上加以改进，采用随机森林法则获取各地类发展概率，并结合随机种子生成及阈值递减机制，在土地利用数量自上而下的约束下，模拟土地利用空间格局，能更好地从复杂机理层面解释生态系统受土地利用变化影响的内在机制[15-16]。结合乌鲁木齐市实际情况，从自然地理、社会经济和可达性3个角度筛选出高程、坡度、年平均气温、年平均降水量、国内生产总值（GDP）、人口密度、到道路距离、到水域距离8个驱动因子。根据2015年和2020年6种土地利用

表1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据类型	数据名称	初始数据来源
基础数据	行政边界、土地利用数据	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）
驱动因子	高程、坡度	地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）
	年平均气温、年平均降水量、人口密度、国内生产总值（GDP）	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）
	到水域距离、到道路距离	地理国情监测平台（http://www.dsac.cn/）
价值因子	年平均粮食产量	新疆维吾尔自治区统计局（xinjiang.gov.cn）
	年平均粮食价格	《全国农产品成本收益资料汇编》[14]

类型的转移规律设置领域权重[17]，其中耕地为0.48、林地为0.49、草地为0.00、水域为0.55、建设用地为0.76、未利用地为1.00。模拟结果在整体轮廓上与土地利用现状高度相似（图2），Kappa系数为0.84，总精度为0.90，FoM（Figure of merit）系数为0.13，表明该模型在本研究中具有较好的适用性[18]。

2.2.2 多情景设置 区域发展需求的变化是编制国土空间规划的重要影响因素，不同区域发展诉求决定了国土空间发展定位，进行未来多种发展情景下土地利用模拟预测（表2），可为决策者提供前瞻性的决策参考，辅助其制定科学合理的土地利用规划，进而优化国土空间布局，对协调人地关系、稳定社会经济发展至关重要。

2.2.3 生态系统服务价值估算 本研究运用谢高地当量因子法[19]，结合研究区实际情况对粮食价格和生物量进行修订，并通过生态系统敏感性分析最终得出符合乌鲁木齐市的ESV当量系数。

（1）基于粮食价格因子的修订

考虑到社会经济条件的异质性，将单位面积农田生态系统粮食生产经济价值的1/7作为1个标准当量因子的ESV量[20]，对乌鲁木齐市单位面积生态系统服务的经济价值进行修正，修订方法如下：

$$VC = \frac{1}{7} \times P \times Q \tag{1}$$

式中：VC为乌鲁木齐市单位面积生态系统服务的经济价值（元·hm^{-2}）；P为2020年全国粮食作物平均市场价格（元）；Q为2020年乌鲁木齐市粮食作物单位面积产量（kg·hm^{-2}）。

（2）基于生物量因子的修订

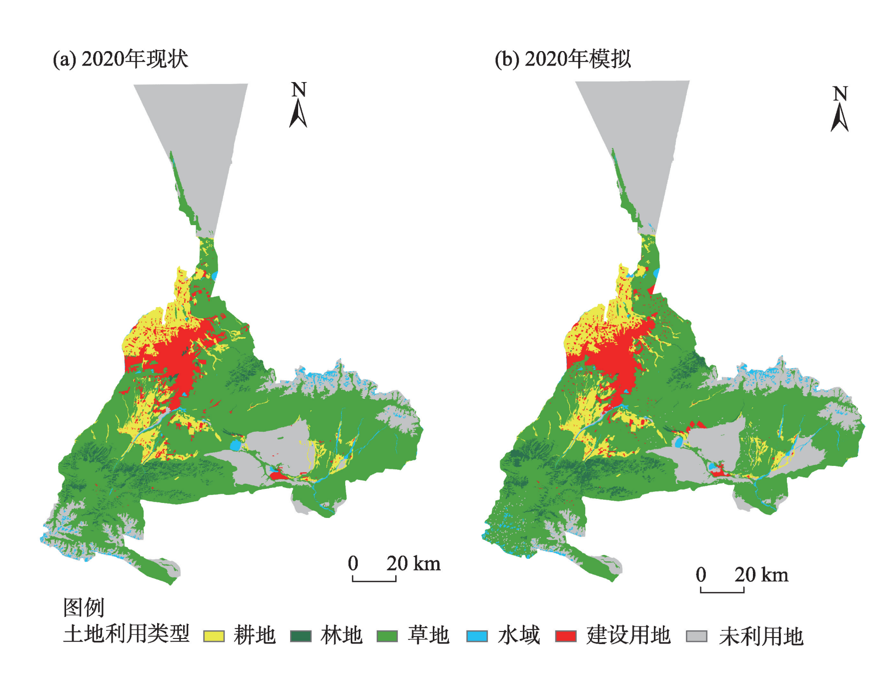
考虑到生态空间布局的异质性，根据谢高地等学者的研究成果，确定研究区生物量因子为0.58[21]，修订得出乌鲁木齐市单位面积ESV系数（表3）。

2.2.4 敏感性分析 敏感性指数常用来表征随着时间序列的变化，ESV对生态服务价值当量系数的依赖程度，以期检验生态服务价值当量系数的合理性[22]。计算公式如下：

$$CS = \left| \frac{\left(ESV_p - ESV_q\right)/ESV_q}{\left(VC_{pr} - VC_{qr}\right)/VC_{pr}} \right| \tag{2}$$

式中：CS为敏感性指数；ESV_p与ESV_q为初期及调整后的ESV；VC_{pr}与VC_{qr}为初期及调整后（±50%）的各地类ESV系数。由图3可知，研究期内CS值均小于1，说明修正后的ESV系数符合乌鲁木齐市的实际情况。

2.2.5 空间自相关分析 为探究乌鲁木齐市ESV空间集聚特征并避免其受限于行政区划，本文将研究区划分为1 km的网格单元，在此基础上对未来4种发展情境进行全局自相关分析；并选取较符合乌鲁



注：PLUS模型为斑块生成土地利用模拟模型。

图2　2020年土地利用现状与PLUS模型模拟对比

Fig. 2　Comparison between present statue of land use and PLUS model simulation in 2020

表2 多情景发展设置

Tab. 2 Multiple scenarios development setting

情景模式	发展设定
惯性发展情景(Ⅰ)	此情景借助耦合模型中的Markov链预测各地类未来发展规模,作为PLUS模型中的栅格需求参数,是其他模拟情景设置的基础。
生态保护情景(Ⅱ)	此情景增加生态保护设定,控制生态用地向生产、生活用地的转化,提高其他用地向林地、草地、水域转化概率,生态景观整体向优发展。
综合开发情景(Ⅲ)	此情景遵循"在保护中开发,在开发中保护"的原则,提升城镇建设用地在全域比重的同时,尽量减少城镇扩张对生态系统服务带来的不良影响,努力营造人地和谐共生的发展局面。
重点开发情景(Ⅳ)	此情景为在快速城市化背景下,当生态用地与生产、生活用地需求发生冲突时,优先满足城市居民生产经营、居住与休闲用地需求,实现经济效益最大化。

注:PLUS模型为斑块生成土地利用模拟模型。

表3 乌鲁木齐市生态系统服务价值系数

Tab. 3 Coefficient of ecosystem service value in Urumqi City /元·hm^{-2}

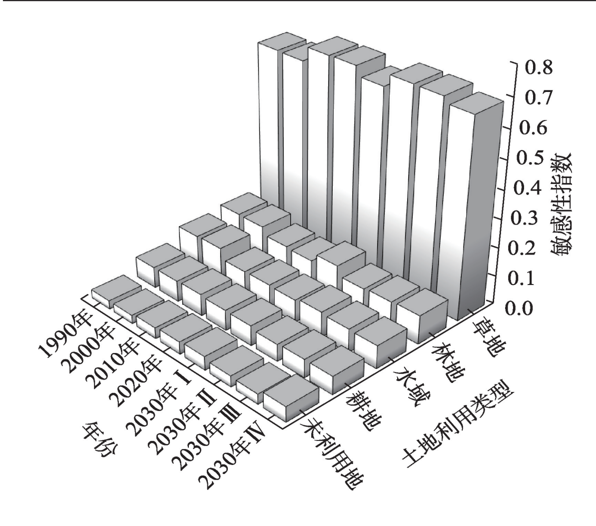
一级类型	二级类型	土地利用类型				
		耕地	林地	草地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	2707.65	893.52	1164.29	1435.05	54.15
	原材料生产	1055.98	8068.80	974.75	947.68	108.31
调节服务	气体调节	1949.51	11697.05	4061.48	1380.90	162.46
	气候调节	2626.42	11020.14	4223.93	5577.76	351.99
	水源涵养	2084.89	11074.29	4115.63	50822.59	189.54
	废物处理	3763.63	4657.16	3574.10	40208.60	703.99
支持服务	土壤保持	3980.25	10884.75	6065.14	1110.14	460.30
	维持生物多样性	2761.80	12211.50	5063.31	9287.24	1083.06
文化服务	美学景观	460.30	5631.91	2355.66	12021.97	649.84
合计		21390.43	76139.12	31598.29	122791.93	3763.64

木齐市未来城市发展定位的综合开发情景,在Geoda 1.20.0软件中进行双变量局部自相关分析以探究各项服务价值之间的权衡协同关系。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空演变特征

1990—2020年,乌鲁木齐市的主要用地类型为草地和未利用地,二者共占辖区面积的80%左右,其中草地面积占52%以上,30 a间主要的土地利用转化模式为草地-未利用地、耕地-建设用地,其中草地-未利用地间的转化最为显著(表4)。2030年在惯性发展情境下,各类用地变化与历史发展规律较为吻合,其中耕地、草地、水域面积继续呈现下降趋势,降幅分别为0.46%、0.71%、0.62%;建设用地、未利用地面积继续呈现上升趋势,增幅分别为1.74%和0.80%;林地出现唯一逆土地利用变化规律发展,面积增加119.62 km^2,这表明乌鲁木齐市"荒山绿化工程""园林城市建设"取得一定成效。在生态保护情境下,乌鲁木齐市注重绿色发展,建成区低效用地将得到有效整治,建设用地面积减少130.86 km^2,大面积未利用地出现负向转化,主要转化为林地、草地及水域等生态用地,三者增幅分别为0.28%、0.67%、1.38%,其中草地面积增加高达491.12 km^2。在综合开发情境下,乌鲁木齐市的发展兼顾经济发展与环境保护,建设用地面积增幅为3.00%,仅次于重点开发情景,此情景在为城市建设留有足够发展空间的同时,未利用地得到最大程度的开发,净减少589.02 km^2。在重点开发情境下,城镇用地规划布局优先满足经济发展需求,建设用地扩张最为剧烈达5.00%,与基期年相比面积骤增441.29 km^2,建设用地快速扩张的同时挤占了城市周边的大量优质农田。值得注意的是,在未来4种发展情景下乌鲁木齐市耕地面积均处于收缩状态,



注：Ⅰ为惯性发展情景；Ⅱ为生态保护情景；Ⅲ为综合开发情景；Ⅳ为重点开发情景。下同。

图3　1990—2030年乌鲁木齐市生态服务价值当量系数敏感性指数

Fig. 3　Sensitivity index of coefficient of ecosystem service value in Urumqi City from 1990 to 2030

这是由于受到乌鲁木齐市三面环山的地形限制，使得适宜开发建设区和优质农田保护区重叠于西部平原，致使城镇基础设施建设必然与耕地保护之间发生冲突。

3.2　生态系统服务价值(ESV)时空演变特征

如表5所示，在过去30 a间乌鲁木齐市ESV整体上呈现"V"型下降态势。1990—2000年降幅极缓不足1.00×10^8元；2000年在西部开大发的机遇下，乌鲁木齐市社会经济发展迅速，土地利用需求日趋多元化，大规模的开发建设活动导致生态环境遭到破坏，使得2000—2010年ESV由386.46×10^8元降至342.46×10^8元，急剧减少44.00×10^8元；随着城市环境的污染、科学发展观的提出以及地方政府对国家可持续发展战略的响应，人们生态保护修复意识不断增强，使得2010—2020年ESV损失量放缓。2030年在惯性发展情境下，土地利用格局保持原有发展趋势，ESV将继续降低8.84×10^8元，表明以往的土地利用方式已不适合乌鲁木齐市未来发展；在生态保护情境下，研究区ESV增幅最大，从327.32×10^8元上升到343.58×10^8元，增加16.26×10^8元，这与研究区林、草地等ESV贡献率高的地类面积增长有着直接关系；在综合开发情景下，米东区北部的未利用地得到4种情境下最大程度的开发利用，转化为林地、草地、水域等生态用地，使得ESV同样处于上升趋势，增加11.13×10^8元；在重点发展情景下，乌鲁木齐市注重经济发展用地需求，对生态环境造成极大压力，ESV下行趋势最为明显，净减少27.96×10^8元。

由图4可知，1990—2030年乌鲁木齐市ESV空间分布特征较为一致，呈现明显的西南部高、东部和北部低的空间格局，高值区主要分布于乌鲁木齐县至达坂城区轴线上、米泉林场和天山牧场等林地、草地密集区以及湖泊、河流分布区；低值区主要分布在主城区、米东区的古尔班通古特沙漠以及达坂城区柴窝堡湖-盐湖周边的未利用地。2030年在惯性发展情景下，延续以往土地利用方式，ESV空间分布特征变化较小与2020年分布相似；在生态保护情境下，随着城区建设用地的整治、建成区面积的

表4　1990—2030年乌鲁木齐市不同土地利用类型面积

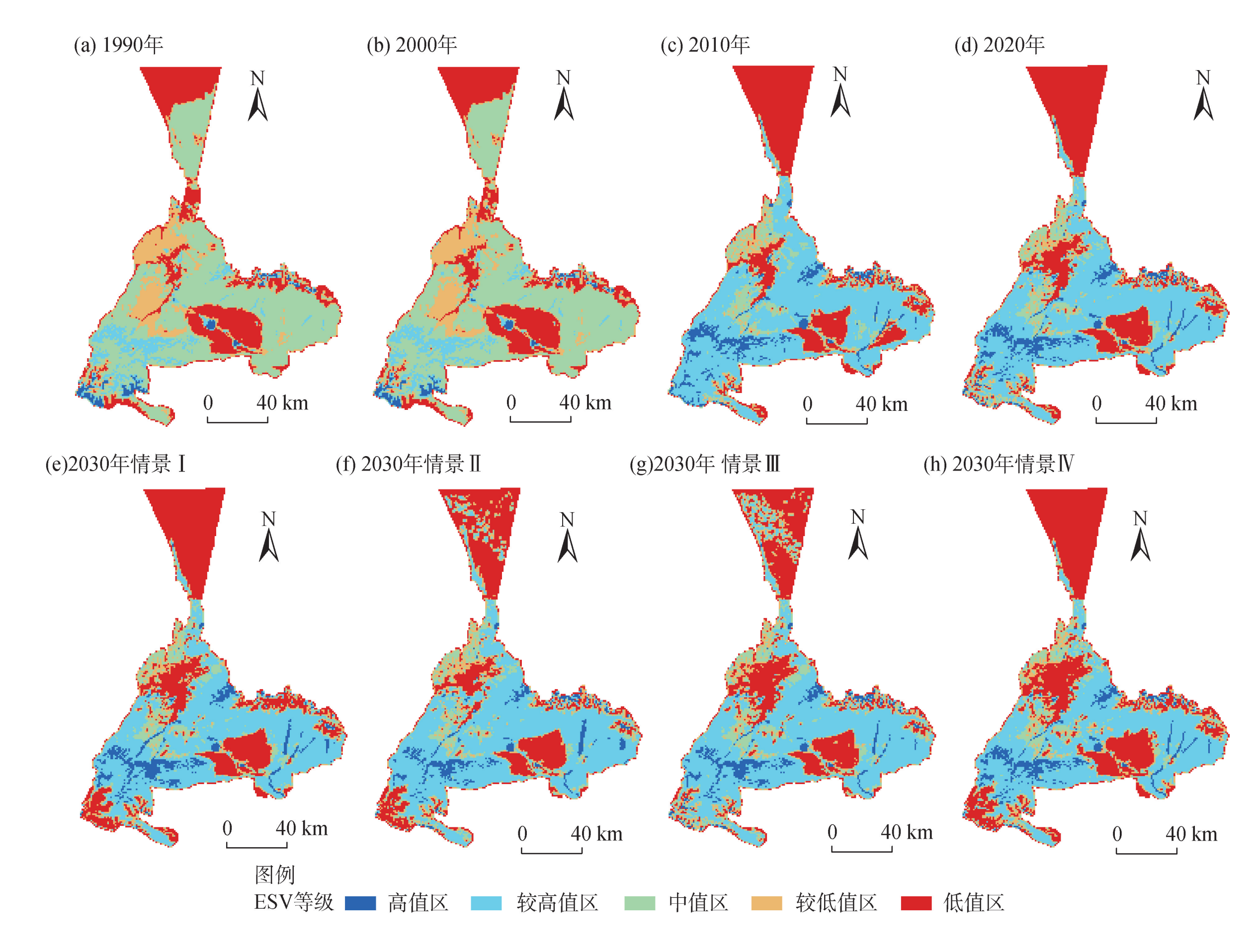
Tab. 4　Area of different land use types in Urumqi City from 1990 to 2030

	年份	情景模式	土地利用类型					
			耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
面积/km²	1990		1353.52	646.09	7980.64	364.22	289.87	3149.63
	2000		1351.59	637.74	7953.80	374.09	349.05	3117.70
	2010		1243.65	445.00	7604.93	229.43	674.10	3586.84
	2020		1120.43	407.76	7288.35	223.87	882.57	3856.69
	2030	Ⅰ	1069.29	527.38	6772.19	210.06	1036.43	4164.32
	2030	Ⅱ	985.03	419.03	7779.47	254.78	751.71	3589.66
	2030	Ⅲ	1040.53	436.30	7652.77	235.07	1147.34	3267.67
	2030	Ⅳ	911.89	402.86	6584.45	201.49	1323.86	4355.14
面积变化幅度/%	2020—2030	Ⅰ	−0.46	2.93	−0.71	−0.62	1.74	0.80
	2020—2030	Ⅱ	−1.21	0.28	0.67	1.38	−1.48	−0.69
	2020—2030	Ⅲ	−0.71	0.70	0.50	0.50	3.00	−1.53
	2020—2030	Ⅳ	−1.86	−0.12	−0.97	−1.00	5.00	1.29

表5 1990—2030年乌鲁木齐市生态系统服务价值(ESV)

Tab. 5 Ecosystem service value (ESV) in Urumqi City from 1990 to 2030 /10^8元

年份	情景模式	生态系统服务类型				
		供给服务	调节服务	支持服务	文化服务	合计
1990		29.34	206.57	121.51	29.49	386.91
2000		29.21	206.72	121.06	29.47	386.46
2010		26.07	179.10	111.21	26.08	342.46
2020		24.62	171.16	106.36	25.18	327.32
2030	Ⅰ	24.41	166.06	103.36	24.65	318.48
2030	Ⅱ	25.29	180.68	111.08	26.53	343.58
2030	Ⅲ	25.29	177.51	109.74	25.91	338.45
2030	Ⅳ	22.31	156.06	97.54	23.45	299.36



注:ESV等级根据自然间断点分级法划分。

图4 1990—2030年乌鲁木齐市生态系统服务价值(ESV)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecosystem service value (ESV) in Urumqi City from 1990 to 2030

缩小,主城区边缘ESV低值区向较低值区、中值区转化,米东区北部的绿化活动使得ESV有所上升;在综合开发情景下,乌鲁木齐市的发展调动了大量未利用地,主城区ESV低值区扩张的同时,北部未利用地得到大面积的开发,ESV大面积上升;在重点开发情景下,建设用地的迅猛扩张侵占了城郊结合部的大面积农田,主城区ESV低值区面积达到4种情景的峰值。

3.3 生态系统服务权衡与协同空间关系特征

本文采用数理统计分析SPSS探究乌鲁木齐市

不同时间序列生态服务间的权衡协同关系，若Pearson系数>0则为协同关系，且系数越大协同关系越明显；反之，则为权衡关系。若Moran's I>0时，则为空间正相关，且系数越大相关性越显著；反之，则为空间负相关。经Pearson系数和Moran's I相关性检验结果（表6）可知，在2030年4种发展情境下，各项生态服务间以空间正相关的协同关系为主。

为进一步探究乌鲁木齐市各项生态系统服务在空间上的集聚特征，本研究引入双变量空间自相关分析来度量各项服务间的空间关联水平。乌鲁木齐市作为新疆的政治、经济、文化中心，在未来的发展过程中要注重谋求经济、社会、生态三重效益的统一。2030年在综合开发情境下乌鲁木齐市的ESV处于上升趋势，且为城市建设留有足够空间，应为未来理想发展情景，因此本文选取综合开发情景进行接下来的研究分析。

由图5可知，2030年乌鲁木齐市在综合开发情景下各项服务价值呈现出显著的空间集聚特征，各项ESV空间分布关系以协同为主，供给-支持服务与调节-支持服务表现最为显著。"高-高""低-低"协同聚集特征与ESV高值区和低值区分布高度吻合，"高-高"集聚的协同关系主要集中于乌鲁木齐县至达坂城区轴线上，此处位于天山山脉的迎风坡降水丰沛，同时一号冰川的冰雪融水为乌鲁木齐河提供了源源不断的水源补给，使得乌鲁木齐市西南部植被覆盖率较高；"低-低"集聚的协同关系主要分布在主城区、米东区北部以及柴窝堡湖-盐湖周边，由于城市建设用地无序蔓延、人类过度放牧、采矿以及开采地下水等不合理活动导致3处区域成为ESV低值区。此外，表现为权衡关系的格网主要分布于建设用地与耕地的交界地带、乌鲁木齐市西南部的一号冰川及东部博格达山脉附近的冰雪消融区，此3处区域生态脆弱且易受人类活动干扰，导致其表现为权衡特征。此外，供给-文化服务之间的权衡关系在主城区周围表现尤为显著，这是由于粮食生产与景观美学用地间冲突所至。

4 讨 论

ESV是表征生态安全程度的重要指标，准确科学地评估其价值对调节生态系统功能，统筹优化生态格局具有重要意义。1990—2020年乌鲁木齐市ESV大幅下降，与杨振民等[23]研究结果一致，表明城市化等人类活动的干扰造成了土地利用结构的不合理，对生态系统造成一定的负面效应，乌鲁木齐市亟待调整城市发展策略，优化土地利用布局。与杨强强等[24]基于土地利用变化数据对历史时期ESV研究相比，本研究运用PLUS模型预测未来多情景下，乌鲁木齐市ESV变化及权衡协同关系特征，具有一定的动态前瞻性。多情景模拟结果表明，4种土地利用情景设置与ESV变化预期一致，由此可见情景设置较为合理。其中，综合开发情景是优化区域土地利用结构、缓解ESV减少保证乌鲁木齐市在生态保护前提下的高质量发展的最理想模式，而重点开发情景对区域发展具有一定的警示作用。

从权衡发展与保护关系的研究结果上看，2030年4种发展情景下各项生态服务功能间以协同关系为主，权衡关系零星分布于局部地区，这表明在部分区域土地利用存在竞争与博弈关系，经济发展、粮食生产和生态保护之间存在一定程度的用地冲突。本文研究结果可为乌鲁木齐市决策者制定协调经济发展与环境保护双赢的土地政策提供思路，但仍存在一些不足，本文在进行ESV空间权衡协同分析时，缺乏对其内部机理、驱动机制的深入探讨。此外，生态系统服务权衡协同关系存在着空间尺度分异[25]，未来可展开精细尺度研究为决策者和

表6　1990—2030年乌鲁木齐市生态系统服务Pearson系数和Moran's I相关性检验结果

Tab. 6　Correlation test results of Pearson coefficient and Moran's I of ecosystem services in Urumqi City from 1990 to 2030

生态系统服务	Pearson系数				Moran's I			
	情景Ⅰ	情景Ⅱ	情景Ⅲ	情景Ⅳ	情景Ⅰ	情景Ⅱ	情景Ⅲ	情景Ⅳ
供给-调节	0.683	0.602	0.635	0.703	0.573	0.473	0.484	0.577
供给-支持	0.878	0.859	0.858	0.889	0.752	0.703	0.690	0.756
供给-文化	0.635	0.555	0.585	0.650	0.531	0.430	0.445	0.532
调节-支持	0.683	0.679	0.713	0.771	0.644	0.541	0.552	0.642
调节-文化	0.760	0.976	0.972	0.974	0.688	0.665	0.662	0.673
支持-文化	0.973	0.703	0.740	0.783	0.651	0.555	0.571	0.646

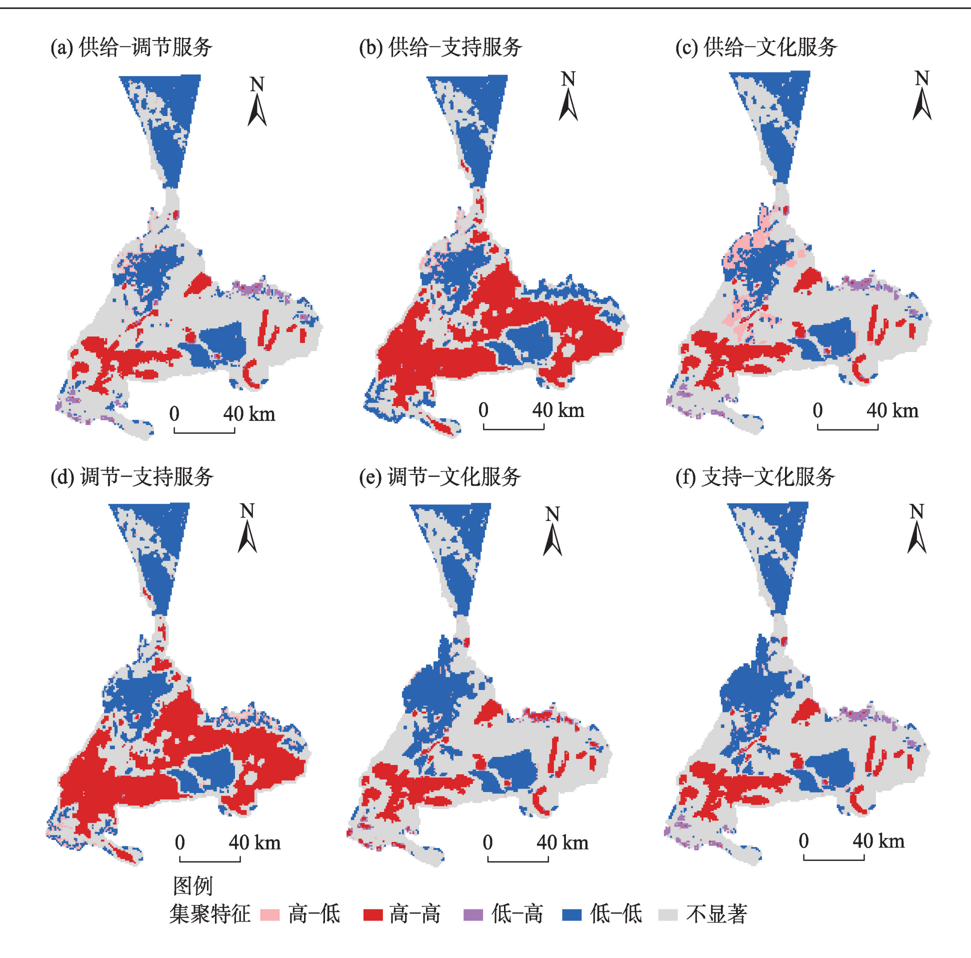


图5 2030年综合开发情景下生态系统服务局部LISA图

Fig. 5 Local LISA graph of ecosystem services under comprehensive development scenario in 2030

利益相关者提供更精准有效的决策支撑。

5 结 论

本文基于PLUS模型动态模拟2030年乌鲁木齐市4种发展情景下土地利用格局,并运用当量因子法定量分析了1990—2030年生态系统服务及其权衡协同关系,得出以下结论:

(1) 1990—2020年,乌鲁木齐市土地利用格局变化显著,呈现"两增四减"的变化趋势。2030年在惯性发展情景下,除林地外其他地类皆遵循历史演变规律;在生态保护情景下建设用地面积萎缩,大面积未利用地向林地、草地、水域等生态用地转化;在综合开发情境下建设用地有所增长的同时,生态用地面积增幅仅次于生态保护情景,成为未来发展理想情景;在重点开发情景下,建设用地面积迅猛增长,耕地退化严重。

(2) 1990—2020年,乌鲁木齐市ESV净减少59.95×10^8元。2030年在生态保护情景、综合开发情景下ESV处于上升趋势;在惯性发展情景、重点开发情景下ESV处于下降趋势;在重点开发情景下,ESV下行趋势最为明显,对乌鲁木齐市未来发展起到一定警示作用。在生态保护情景和综合开发情境下,米东区北部的ESV低值区有望向中高值区转化。

(3) 2030年4种情景下乌鲁木齐市单项ESV呈现显著的空间协同聚集特征。"高-高""低-低"协同聚集区与ESV高值、低值区域分布高度吻合;表现为权衡关系的格网主要分布于建设用地与耕地的交界地带、乌鲁木齐市西南部的一号冰川和东部博格达山脉附近的冰雪消融区。如何权衡发展与保护之间的关系是乌鲁木齐市未来发展亟待解决的问题。

参考文献(References)

[1] 李静芝, 王苗, 冯文静, 等. 湘西州地区生态系统服务价值时空

特征及驱动分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3): 207-217. [Li Jingzhi, Wang Miao, Feng Wenjing, et al. Spatial-temporal characteristic and driving analysis of ecosystem service value in Xiangxi Autonomous[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 207-217.]

[2] 喇蕗梦, 勾蒙蒙, 李乐, 等. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1368-1377. [La Lumeng, Gou Mengmeng, Li Le, et al. Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges Reservoir Area: A case study of Zigui Country[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11): 1368-1377.]

[3] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808. [Wang Jun, Dun Yaolong. A review on the effects of land use change on ecosystem services[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 798-808.]

[4] 李龙, 吴大放, 王芳, 等. 中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究——以佛山市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9023-9036. [Li Long, Wu Dafang, Wang Fang, et al. Prediction and tradeoff analysis of ecosystem service value in the rapidly urbanizing Foshan City of China: A case study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9023-9036.]

[5] 王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 等. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3106-3118. [Wang Yinghui, Ding Jianli, Li Xiaohang, et al. Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River Basin based on an intensity analysis model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3106-3118.]

[6] Hughes J B, Daily G C, Ehrlich P R. Population diversity: Its extent and extinction[J]. Science, 1997, 278(5338): 689-692.

[7] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078. [Wang Pengtao, Zhang Liwei, Li Yingjie, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the upper reaches of Hanjiang River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2064-2078.]

[8] 苗培培, 赵祖军, 赵筱青, 等. 云南典型石漠化区生态系统服务权衡与协同研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 366-374. [Miao Peipei, Zhao Zujun, Zhao Xiaoqing, et al. Study on trade-off and cooperation of ecosystem service space in rocky desertification area of Yunnan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 366-374.]

[9] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述[J]. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1172-1189. [Zhang Yushuo, Wu Dianting, Lü Xiao. A review on the impact of land use/land cover change on ecosystem services from a spatial scale perspective[J]. Journal of Nature Resources, 2020, 35(5): 1172-1189.]

[10] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78. [Zheng Defeng, Hao Shuai, Lü Leting, et al. Spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships among multiple ecosystem services in Three-River-Source National Park[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 64-78.]

[11] 白羽萍, 王佳斌, 刘恋, 等. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析——以张掖市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5187-5199. [Bai Yuping, Wang Jiabin, Liu Lian, et al. Prediction and trade-off analysis of ecosystem service value in Heihe River Basin: A case study in Zhangye[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5187-5199.]

[12] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125-1136.]

[13] 赵永玉, 阿里木江·卡斯木, 高鹏文, 等. 基于地理探测器的乌鲁木齐市城区扩展及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1729-1739. [Zhao Yongyu, Kasim Alimujiang, Gao Pengwen, et al. Quantitative analysis of urban expansion and response factors in Urumqi City based on random forest algorithm and geographical detector[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1729-1739.]

[14] 国家发展和改革委员会价格司, 价格成本调查中心. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 6-24. [National Development and Reform Commission Price Department, Price Cost Survey Center. National compilation of agricultural cost-benefit information[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 6-24.]

[15] Li C, Wu Y, Gao B, et al. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108328, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.0108328.

[16] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, Pergamon, 2021, 85: 101569, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.

[17] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置——以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298. [Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4284-4298.]

[18] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟——以深圳市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2086-2097. [Zhang Xiaoyao, Zhang Xiao, Li Donghua, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen[J]. Acta Eco-

logica Sinica, 2022, 42(6): 2086-2097.]

[19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem service in China[J]. Journal of Nature Resources, 2008, 23(5): 911-919.]

[20] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2749-2755, 3011. [Lu Chunxia, Xie Gaodi, Xiao Yu, et al. Value evaluation of ecosystem service functions on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2749-2755, 3011.]

[21] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13. [Xie Gaodi, Xiao Yu, Zhen Lin, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 10-13.]

[22] 李金雷, 刘欢, 哈斯娜, 等. 岱海流域土地利用动态模拟及生态系统服务价值测算[J]. 生态学杂志, 2022, 41(2): 343-350. [Li Jinlei, Liu Huan, Ha Sina, et al. Simulation of land use and evaluation of ecosystem service value in Daihai Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(2): 343-350.]

[23] 杨振民, 刘新平. 乌鲁木齐市生态系统服务价值时空演变研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(4): 226-236. [Yang Zhenmin, Liu Xinping. Research on ecosystem service value and spatial evolution in Urumqi City[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(4): 226-236.]

[24] 杨强强, 徐光来, 李爱娟, 等. 青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9315-9327. [Yang Qiangqiang, Xu Guanglai, Li Aijuan, et al. Evaluation and trade-off of ecosystem services in the Qingyijiang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(23): 9315-9327.]

[25] 郑德凤, 万巨影, 白丽娜, 等. 燕山-太行山区生态系统服务价值权衡/协同关系的多尺度分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(4): 409-417. [Zheng Defeng, Wan Juying, Bai Lina, et al. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs/synergies in Yanshan-Taihang Mountains area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(4): 409-417.]

Trade-off synergy of ecosystem service value in Urumqi City based on PLUS model

SUI Lu[1], PU Chunling[2], LIU Zhiyou[1], BAI Pengfei[1], LIU Tao[3]

(1. Faculty of Public Administration (Faculty of Law), Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. MPA Education Center, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Land use/cover change will interfere with the stable supply capacity of ecosystems, which in turn poses a threat to ecosystem services and sustainable development. Taking Urumqi City of Xinjiang, China, as the study area, this study simulates land use changes in Urumqi City under multiple scenarios in 2030 based on the patch-generating land use simulation (PLUS) model and combines the equivalent factor method and spatial autocorrelation analysis to estimate and project the ecosystem service value (ESV) and its trade-off synergy for 1990—2030 in Urumqi City. The results are as follows: (1) Land use in Urumqi City shows a trend of "two increases and four decreases" from 1990 to 2020. In the integrated development scenario, the area of built-up land increases, while the area of ecological land is also on the rise; in the key development scenario, the expansion of urban built-up land is the most drastic, and the area of arable land is severely degraded. (2) From 1990 to 2020, the trend of ESV in Urumqi City has a "V" shape. In 2030, ESV increases under the ecological protection scenario and the comprehensive development scenario and decreases under the inertia development scenario and the key development scenario. (3) Under the four development scenarios in 2030, the synergistic relationships among various ecosystem services in Urumqi City are primarily synergistic, with "high-high" and "low-low" synergistic aggregation areas coinciding highly with the distribution of high and low ESV values, and trade-off relationships sporadically distributed in local areas. These findings may serve as a basis for distributing ESVs in Urumqi City and can also provide scientific reference for the spatial planning of Urumqi City and the construction of ecological security patterns.

Key words: ecosystem service value; PLUS model; multi-scenario simulation; trade-off synergy; Urumqi City